Musterlösung

Technische Universität München
Lehrstuhl für Thermodynamik
Prof. Dr.-Ing. T. Sattelmayer · Prof. W. Polifke, Ph.D.

Prüfung MW0136 Verbrennung

02.08.2012 SS 2012 Teil 1: Kurzfragenteil (5 Seiten) (30 min)

1. Schreiben Sie das thermodynamische Gleichgewicht $K_p(T)$ für die Reaktion $CH_3OH \Longleftrightarrow CO + 2H_2$ und geben Sie die Gleichung für $\Delta G^0(T)$ an. Schreiben Sie für eine Komponente von $\Delta G^0(T)$ alle Teilterme aus.

$$K_p(T) = \exp\left(-\frac{\Delta G^\phi(T)}{RT}\right) = \frac{p_{CO} \cdot p_{H_2}^2}{p_{CH_3OH}} \cdot \frac{1}{p_\phi^2} = \frac{X_{CO} X_{H_2}^2}{X_{CH_3OH}} \left(\frac{p}{p_\phi}\right)^2$$

$$\Delta G^\phi(T) = \tilde{g}_{CO}^\phi + 2\tilde{g}_{H_2}^\phi - \tilde{g}_{CH_3OH}^\phi$$

$$\tilde{g}_{CO}^\phi(T) = \tilde{h}_{CO}(T) - T \cdot \left[\tilde{s}_{CO}^\phi + \int_{T_0}^{T} \tilde{c}_{p_{CO}} \frac{dT}{T}\right]$$

$$\tilde{h}_{CO}(T) = \tilde{h}_{CO}^\phi + \int_{T_0}^{T} \tilde{c}_{p_{CO}}\, dT$$

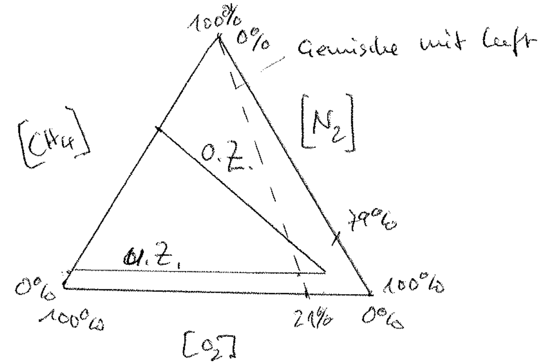
2. Wie berechnet man die spezifische Entropie von Gasgemischen? Verwenden Sie die molare Darstellung und schreiben Sie alle Einzelterme des einzelnen Stoffes aus.

$$\bar{\tilde{s}}_i(T,p) = \sum_{i=1}^{N} \left[X_i \cdot \tilde{s}_i(T, p_i)\right]$$

$$\tilde{s}_i(T,p_i) = \tilde{s}_i^\phi + \int_{T_0}^{T} \frac{\tilde{c}_{p_i}}{T}\, dT - R \ln\left(\frac{p_i}{p_\phi}\right)$$

$$p_i = X_i \cdot p$$

3. Skizzieren Sie das Zündgrenzen Dreiecksdiagramm für CH4 , O2, N2 Gemische mit der Lage der Zündgrenzen. Erklären Sie die Zusammenhänge in Stichworten.



Zündgrenzen primär Energiebilanz: Erreichen von T_Z als Bilanz von Reaktionswärmefreisetzung und Wärmekapazität. U.Z. $\neq f(O_2)$ weil Wärmefreisetzung Brst. limitiert und $\tilde{c}_{pO_2} \approx \tilde{c}_{pN_2}$. O.Z.: Wärmefreisetzung $\sim [O_2] \Rightarrow$ lin. bzs. mit $[O_2]$.

4. Schreiben Sie den Arrhenius Ansatz für eine Vorwärtsreaktion $A + B \longrightarrow$ Produkte und erläutern Sie die Terme.

$$\dot{\omega}_{AB} = A_0 \cdot T^b \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \cdot [A]\,[B]$$

$$= \underbrace{A_0 \cdot T^b}_{A} \cdot \underbrace{\exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right)}_{B} \cdot \underbrace{\bar{n}^2 \cdot X_A \cdot X_B}_{A}$$

Alternativen

- Termgruppe A legt die maximale Stoßfrequenz der Reaktion fest
- Termgruppe B gibt die Wahrscheinlichkeit, dass aus Stoß Reaktion erfolgt an; durch Vergleich von Aktivierungsenergie E_A und kin. Energie der Teilchen RT.

5. Schreiben Sie die Enthalpiebilanz für die vollständige, adiabate Verbrennung eines Kohlenwasserstoffgases C_mH_n mit Luft ($X_{O_2,L} = 0.21\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}, X_{N_2,L} = 0.79\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}$) bei konstantem Druck. Wie ändert sich die adiabate Flammentemperatur bei steigender Luftzahl?

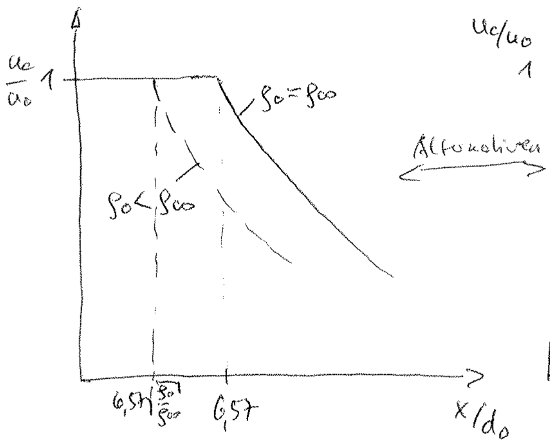
$$\tilde h_{C_mH_n}(T_{C_mH_n}) + \lambda\cdot\left(m+\frac{n}{4}\right)\cdot\left[\tilde h_{O_2}(T_L) + \frac{X_{N_2L}}{X_{O_2L}}\cdot\tilde h_{N_2}(T_L)\right]$$

$$= m\,\tilde h_{CO_2}(T_{ad}) + \frac{n}{2}\,\tilde h_{H_2O}(T_{ad}) + \left[\lambda\,\frac{X_{N_2L}}{X_{O_2L}}\cdot\tilde h_{N_2}(T_{ad}) + (\lambda-1)\,\tilde h_{O_2}(T_{ad})\right]\left(m+\frac{n}{4}\right)$$

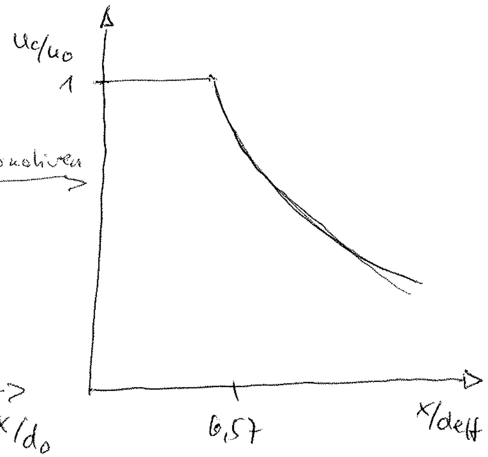
$\lambda \uparrow \qquad T_{ad} \downarrow$

6. Geben Sie das Geschwindigkeitsgesetz $u_c/u_0 = f(x/d_{eff})$ der Axialgeschwindigkeit auf der Achse eines runden, turbulenten Freistrahles an. Skizzieren Sie qualitativ den Verlauf dieses Strahles, wenn er in eine Umgebung gleicher Dichte strömt, sowie den Verlauf, der sich ergibt, wenn die Umgebungsdichte größer als die des Strahlmediums ist. Welcher Parameter ist maßgebend für den Geschwindigkeitsverlauf?

$\frac{u_c}{u_0} = \frac{6{,}57}{x/d_{eff}}$; $d_{eff} = d_0\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_\infty}}$ maßgebender Parameter



Alternativen

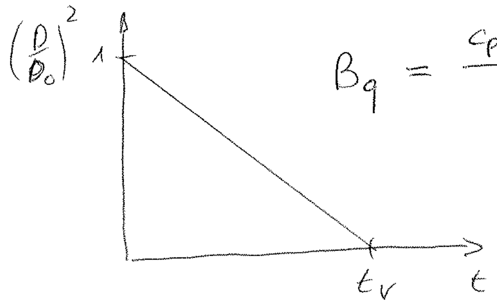


7. Was ist das Kennzeichen der turbulenten Diffusionsstrahlflamme? Wovon hängt die Flammenlänge ab?

- Invarianz der Flammenlänge vom Durchsatz!
- $L_F = f(d_0, l_{min})$

$L_F \sim d_0$; $L_F \sim l_{min}$

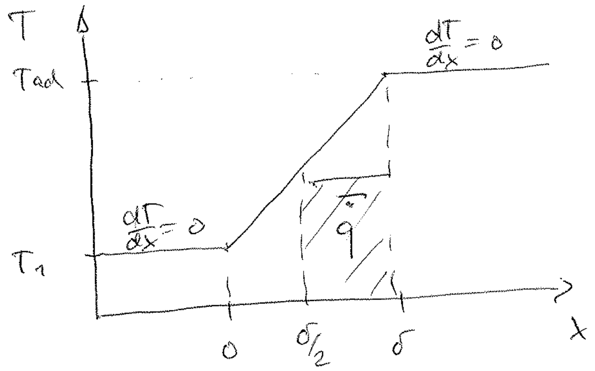
8. Skizzieren Sie den Verlauf des $D^2 - t$ Tropfenverdampfungsmodells. Welches Verhältnis ist für die Verdampfung charakteristisch?



$$B_q = \frac{c_p(T_\infty - T_s)}{\Delta h_v}$$

T_∞ = Umgebungstemperatur
T_s = Siedetemperatur
Δh_v = Verdampfungsenthalpie
c_p = spez. Wärmekapazität Umgebung

9. Skizzieren Sie den Temperaturverlauf einer 1-d laminaren Vormischflammenfront unter Verwendung der Theorie von Spalding. Welchen Trick wendet Spalding an? Welche Bereiche können Sie unterscheiden? Welche Bedingungen gelten dort? Welche Parameter können Sie anhand dieses Ansatzes bestimmen?



- Abschnittsweise lineare Temperaturprofile
- Verschwindende T-Gradienten an den Rändern
- 2 Bereiche: 1) Vorwärmzone
  2) Reaktionszone

In 1) ist der Reaktionsterm Null und es ergibt sich GGW von Diffusion und Konvektion

In 2) sind alle 3 Terme ungleich Null.

$\Rightarrow$ 2 Gleichungen für 2 Parameter

s_l : lam. Brenngeschwindigkeit

δ_l = lam. Flammendicke

Technische Universität München
Lehrstuhl für Thermodynamik
Prof. Dr.-Ing. T. Sattelmayer · Prof. W. Polifke, Ph.D.

Prüfung MW0136 Verbrennung

02.08.2012 SS 2012 Teil 2: Berechnungsteil (60 min)

Name: ________________ , Matrikelnummer: ________________

Allgemeine Hinweise zur Bearbeitung

Bitte schreiben Sie Ihren **Namen und die Matrikelnummer** auf das Deckblatt und auf jedes Blatt Ihrer Ausarbeitung.

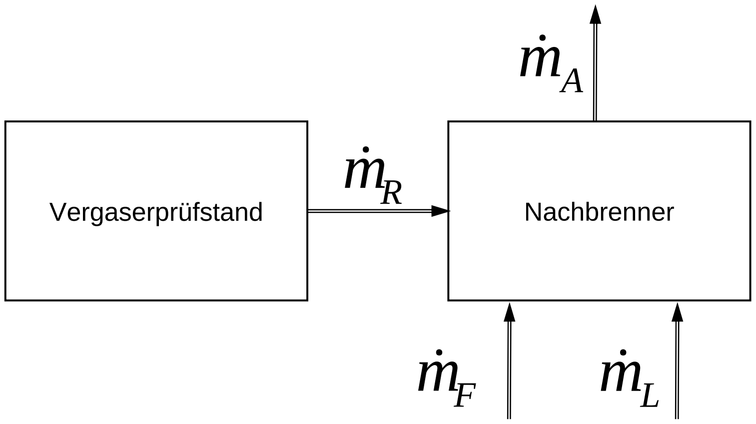
Formulieren Sie bei der Bearbeitung aller Teilaufgaben in dieser Prüfung zunächst **unbedingt Ihren Ansatz in symbolischer Form** unter Verwendung der vorgegebenen Formelzeichen, bevor Sie Zahlenwertgleichungen ausführen, da der allgemeine Ansatz den wesentlichen Teil der Bewertungspunkte ergibt. **Reine Zahlenwertgleichungen ergeben allein nicht die volle erreichbare Punktzahl**. Bitte bedenken Sie, wie schnell man sich verrechnet.

Da Sie im Schnitt 10 Min pro Teilaufgabe haben, können Sie ohne Schwierigkeiten eine gut leserliche Darbietung Ihrer Lösung verfassen. Sie helfen damit nicht nur dem Korrektor bei der Würdigung Ihrer Leistung, sondern auch sich selbst, weil Sie ggf. leichter Fehler erkennen.

Wenn Sie im Verlauf Ihrer Überlegungen verschiedene Ansätze hingeschrieben haben, müssen Sie die nach Ihrer Meinung falschen Ansätze klar erkennbar streichen, da sonst alles als Fehler gewertet werden muss, auch wenn der richtige Ansatz dabei wäre.

Verwenden Sie **auf keinen Fall grüne und rote Stifte** weil diese den Korrektoren vorbehalten sind. Verwenden Sie einen Dokumenten- echten Stift (Füller, Kuli).

Legen Sie bereits bearbeitete Blätter in den Mantelbogen, damit Sie nicht vergessen, sie abzugeben.



Der Produktgasstrom $\dot{m}_R$ aus einem Vergasungsprüfstand enthält neben Wasserstoff auch größere Mengen Kohlenmonoxid und muss darum mit einem Nachbrenner verbrannt werden. Das Designkonzept sieht vor, dass der Produktgasstrom von einer vorgemischten Erdgasflamme eingemischt wird und dabei mit dem Restsauerstoff der Erdgasflamme verbrennt. Um vollständigen Umsatz des Produktgasstromes zu gewährleisten, soll der von der Erdgasflamme bereitgestellte Restluftstrom 15% über dem stöchiometrisch erforderlichen Luftstrom des Produktgases liegen.

1 Das Produktgas hat die folgende Zusammensetzung:

$$X_{H_2,R} = 0,286\frac{\mathrm{kmol_{H_2}}}{\mathrm{kmol_R}} \qquad X_{CO,R} = 0,178\frac{\mathrm{kmol_{CO}}}{\mathrm{kmol_R}}$$

$$X_{CO_2,R} = 0,036\frac{\mathrm{kmol_{CO_2}}}{\mathrm{kmol_R}} \qquad X_{H_2O,R} = 0,071\frac{\mathrm{kmol_{H_2O}}}{\mathrm{kmol_R}} \qquad X_{N_2,R} = 0,429\frac{\mathrm{kmol_{N_2}}}{\mathrm{kmol_R}}$$

Bestimmen Sie die Molmasse des Produktgases M_R sowie dessen massebezogenen stöchiometrischen Luftbedarf $l_{min,R}$. Welchen massebezogenen unteren Heizwert $H_{u,R}$ hat das Produktgas?

(*Notfallwerte:* $M_R = 20,5\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$, $l_{min,R} = 1,56\frac{\mathrm{kg_{L,st}}}{\mathrm{kg_R}}$)

2 Der Produktgasstrom ist mit dem Norm- Volumenstrom $\dot{V}_R = 250\ \mathrm{l_N/min}$ spezifiziert. Berechnen Sie die Normdichte $\varrho_{N,R}$ und damit den Produktgasmassenstrom $\dot{m}_R$. Wie groß ist der erforderliche Verbrennungsluftstrom $\dot{m}_{L,R}$ bei einem geforderten Luftüberschuss von 15% ?

(*Notfallwerte:* $\dot{m}_R = 3,8\cdot 10^{-3}\mathrm{kg/s}$, $\dot{m}_{L,R} = 6,8\cdot 10^{-3}\mathrm{kg/s}$)

3 Luft und Erdgas des Nachbrenners werden bei Standardtemperatur $T_0 = 293K$ zugeführt. **Ohne** Zuführung des Produktgasstromes soll die Erdgasflamme mit einer Flammentemperatur von $T_P = 1795K$ betrieben werden. Stellen Sie die adiabate Enthalpiebilanz der Erdgasflamme auf und berechnen Sie die erforderliche Luftzahl λ_P unter Verwendung folgender Werte. Stöchiometrischer Luftbedarf Erdgas: $l_{min,P} = 17,16\frac{\mathrm{kg_{L,st}}}{\mathrm{kg_P}}$, unterer Heizwert $H_{u,P} = 50000\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg_P}}$, integrale mittlere Wärmekapazität des Abgases $\bar{c}_{p,AP}|_{T_0}^{T_P} = 1,278\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kgK}}$. Welchen Erdgasmassenstrom $\dot{m}_F$ und welchen Luftmassenstrom $\dot{m}_L$ benötigen Sie, damit Sie den Luftbedarf $\dot{m}_{L,R}$ des Produktgasstromes decken? Welcher Feuerungsleistung $P_{th,P}$ entspricht das?

(*Notfallwerte:* $\lambda_P = 1,46$, $\dot{m}_F = 8,64\cdot 10^{-4}\mathrm{kg/s}$, $\dot{m}_L = 21,65\cdot 10^{-3}\mathrm{kg/s}$)

4 Berechnen Sie unter Annahme vollständiger Verbrennung die Molenbrüche $X_{i,A}$ des Abgases des Nachbrenners **mit** Zuführung des Produktgasstromes. Bestimmen Sie hierzu zunächst die Massenbrüche von Produktgas y_R, Erdgas y_F und Verbrennungsluftstrom y_L am nicht- reagierten Gemisch. Bilden Sie damit die spezifischen Molzahlen Z_R, Z_F und Z_L der Reaktanden. Ermitteln Sie daraus unter Berücksichtigung der Zusammensetzung der Reaktanden die spezifischen Molzahlen $Z_{i,A}$ des vollständig reagierten Abgases und dessen Molmasse M_A. Der Erdgasstrom $\dot{m}_F$ soll hierbei als Methan gerechnet werden.

Allgemeine Angaben

$$X_{O_2,L} = 0,21\frac{\mathrm{kmol_{O_2}}}{\mathrm{kmol_L}} \qquad X_{N_2,L} = 0,79\frac{\mathrm{kmol_{N_2}}}{\mathrm{kmol_L}}$$

Molmassen:

$$M_L = 28,84\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}} \qquad M_{CH_4} = 16\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$$

$$M_{H_2} = 2\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}} \qquad M_{CO} = 28\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}} \qquad M_{CO_2} = 44\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$$

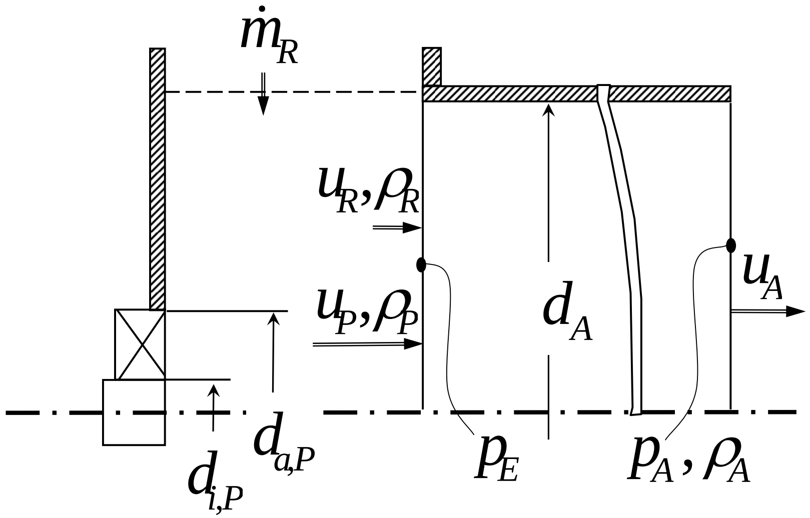
$$M_{H_2O} = 18\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}} \qquad M_{O_2} = 32\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}} \qquad M_{N_2} = 28\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$$

Standardbildungsenthalpien:

$$\tilde{h}^0_{CO} = -110,52\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{mol}} \qquad \tilde{h}^0_{CO_2} = -393,51\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{mol}} \qquad \tilde{h}^0_{H_2O,g} = -241,82\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{mol}}$$

Temperaturen: $T_0 = 293\mathrm{K}$, $T_N = 273\mathrm{K}$

Drücke: $p_N = 1,013\cdot 10^5\mathrm{Pa}$



Das Bild zeigt ein vereinfachtes Schema der in etwa axisymmetrischen Geometrie des Nachbrenners. Insbesondere ist links der Ringspalt der Gemischdüse des Drallbrenners mit dem Außendurchmesser $d_{a,P}$ und dem Innendurchmesser $d_{i,P}$ gezeigt. Die Brennkammer hat den Innendurchmesser $d_A = 0.13\mathrm{m}$. Radial wird der Produktgasstrom zugeführt, der dann vom Drallstrahl der Erdgasflamme eingemischt wird. Am Eintritt **E** der Brennkammer seien die Werte des Gemischstroms: Geschwindigkeit u_P und dessen Dichte ϱ_P gleich denen an der Brennerdüse, während der Rest des Querschnitts vom Produktgasstrom mit der Geschwindigkeit u_R und der Dichte ϱ_R gefüllt werden. Der Druck über den Eintrittsquerschnitt sei p_E. Am Abgasaustritt **A** werden eine konstante Austrittsgeschwindigkeit u_A, der Druck p_A und die ϱ_A angenommen.

5 Zur Dimensionierung des Erdgasbrenners wenden Sie geometrische Ähnlichkeit und Damköhlerzahlähnlichkeit mit einem bekannten Referenzbrenner an. Der Referenzbrenner, der mit $P_{th,\mathrm{ref}} = 50\mathrm{kW}$ Leistung bei der Luftzahl $\lambda_{\mathrm{ref}} = 1,3$ und mit $T_{1,\mathrm{ref}} = 293\mathrm{K}$ arbeitet, hat folgende Kenndaten. Aussendurchmesser $d_{a,\mathrm{ref}} = 0,032\mathrm{m}$, Innendurchmesser $d_{i,ref} = 0,016\mathrm{m}$, Gemischmassenstrom $\dot{m}_{P,\mathrm{ref}} = 23,3 \cdot 10^{-3}\mathrm{kg/s}$, laminare Brenngeschwindigkeit $s_{l,\mathrm{ref}} = 0,23\mathrm{m/s}$. Bei der Auslegungsluftzahl $\lambda_P = 1,46$ beträgt die laminare Brenngeschwindigkeit $s_{l,P} = 0,156\mathrm{m/s}$. Stellen Sie zunächst die Damköhlerzahlgleichung mit dem Aussendurchmesser und dem Massenstrom auf und vernachlässigen Sie dann die Änderung der Gemischdichte und der thermischen Diffusivität.

(*Notfallwerte:* $d_{a,P} = 0,041\mathrm{m}$, $d_{i,P} = 0,0205\mathrm{m}$)

6 Gegeben sind die Geschwindigkeiten des Produktgases $u_R = 1,2\mathrm{m/s}$, des Erdgas-Luft-Gemischs $u_P = 20,3\mathrm{m/s}$ und des Abgases $u_A = 13\mathrm{m/s}$. Berechnen Sie unter Anwendung des Impulssatzes am Brennkammerrohr die Differenz der statischen Drücke $\Delta p_{EA} = p_E - p_A$. Vernachlässigen Sie die Wandreibung.

Allgemeine Angaben

$X_{O_2,L} = 0,21 \frac{\mathrm{kmol_{O_2}}}{\mathrm{kmol_L}}$ $\qquad$ $X_{N_2,L} = 0,79 \frac{\mathrm{kmol_{N_2}}}{\mathrm{kmol_L}}$

Molmassen:

$M_L = 28,84 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$ $\qquad$ $M_{CH_4} = 16 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$

$M_{H_2} = 2 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$ $\qquad$ $M_{CO} = 28 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$ $\qquad$ $M_{CO_2} = 44 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$

$M_{H_2O} = 18 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$ $\qquad$ $M_{O_2} = 32 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$ $\qquad$ $M_{N_2} = 28 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$

Standardbildungsenthalpien:

$\tilde{h}^0_{CO} = -110,52 \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{mol}}$ $\qquad$ $\tilde{h}^0_{CO_2} = -393,51 \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{mol}}$ $\qquad$ $\tilde{h}^0_{H_2O,g} = -241,82 \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{mol}}$

Temperaturen: $T_0 = 293\mathrm{K}$, $T_N = 273\mathrm{K}$

Drücke: $p_N = 1,013 \cdot 10^5\mathrm{Pa}$

Teil 2 Musterlösung

2.1

$$\bar{M}_R = X_{N_2,R} \cdot M_{N_2} + X_{H_2,R} \cdot M_{H_2} + X_{CO,R} \cdot M_{CO} + X_{CO_2,R} \cdot M_{CO_2} + X_{H_2O,R} \cdot M_{H_2O}$$

$$= 0{,}429 \cdot 28 + 0{,}286 \cdot 2 + 0{,}178 \cdot 28 + 0{,}036 \cdot 44 + 0{,}071 \cdot 18$$

$$= 20{,}43 \ \frac{kg_R}{kmol_R}$$

Reaktionen: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$

$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$

$$l_{min,R} = \left(X_{H_2,R} \cdot \frac{1}{2} + X_{CO,R} \cdot \frac{1}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{79}{21}\right) \cdot \frac{\bar{M}_L}{\bar{M}_R} = 1{,}56 \ \frac{kg_L}{kg_R}$$

$$\tilde{H}_u = X_{H_2,R} \cdot \left(\emptyset - \tilde{h}^{\emptyset}_{H_2O_g}\right) + X_{CO}\left(\tilde{h}^{\emptyset}_{CO} - \tilde{h}^{\emptyset}_{CO_2}\right)$$

$$= 0{,}286 \cdot 241\,820 + 0{,}178 \cdot (-110520 + 393510)$$

$$= 119532 \ \frac{kJ}{kmol_R}$$

$$H_u = \tilde{H}_u \cdot \frac{1}{\bar{M}_R} = 5851 \ \frac{kJ}{kg_R}$$

2.2

$$\rho_{N,R} = \frac{p_N \cdot \bar{M}_R}{\mathcal{R} \cdot T_N} = 0{,}914 \ \frac{kg}{m^3_N}$$

$$\dot{m}_R = \dot{V}_{N,R} \cdot \rho_{N,R} = \frac{250}{60 \cdot 1000} \cdot 0{,}914 = 3{,}8 \cdot 10^{-3} \ \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{L,R} = \dot{m}_R \cdot l_{min,R} \cdot \lambda_R = 3{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}56 \cdot 1{,}15 = 6{,}835 \cdot 10^{-3} \ \frac{kg}{s}$$

2.3

$$\dot{m}_F \cdot \left[\bar{c}_{pF} \underbrace{(T_F - T_0)}_{=0} + H_{u,p}\right] + \dot{m}_L \bar{c}_{pL} \underbrace{(T_L - T_\emptyset)}_{=0}$$

$$- (\dot{m}_F + \dot{m}_L)\, \bar{c}_{pA} (T_p - T_\emptyset) = \emptyset$$

$$H_{u,p} - (1 + \lambda_p l_{min,p}) \cdot \bar{c}_{pA} (T_p - T_\emptyset) = \emptyset$$

$$\lambda_p = \frac{1}{l_{min,p}} \cdot \left[\frac{H_{u,p}}{\bar{c}_{pA}(T_p - T_\emptyset)} - 1\right]$$

$$= \frac{1}{17{,}16} \cdot \left[\frac{50000}{1{,}278\,(1795 - 293)} - 1\right]$$

$$= 1{,}46$$

Restluftstrom ist:

$$\dot{m}_F (\lambda_p - 1)\, l_{min,p} = \dot{m}_{L,R}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_F = \frac{\dot{m}_{L,R}}{(\lambda_p - 1) \cdot l_{min,p}} = 8{,}6 \cdot 10^{-4} \ \frac{kg}{s}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_L = \lambda_p \cdot l_{min,p} \cdot \dot{m}_F = 0{,}0215 \ \frac{kg}{s}$$

Feuerungsleistung

$$P_{th,p} = \dot{m}_F H_{u,p} = 43 \ kW$$

2.4 3/5

$$Y_R = \frac{\dot m_R}{\dot m_R + \dot m_F + \dot m_L} = 0{,}144 \ \frac{kg_R}{kg_{tot}}$$

$$Y_F = \frac{\dot m_F}{\dot m_R + \dot m_F + \dot m_L} = 0{,}033 \ \frac{kg_F}{kg_{tot}}$$

$$Y_L = \frac{\dot m_L}{\dot m_R + \dot m_F + \dot m_L} = 0{,}823 \ \frac{kg_L}{kg_{tot}}$$

$$z_R = \frac{Y_R}{M_R} = 7{,}05 \cdot 10^{-3} \ \frac{kmol_R}{kg_{tot}}$$

$$z_F = \frac{Y_F}{M_{CH_4}} = 2{,}065 \cdot 10^{-3} \ \frac{kmol_F}{kg_{tot}}$$

$$z_L = \frac{Y_L}{M_L} = 0{,}02854 \ \frac{kmol_L}{kg_{tot}}$$

Reaktionen
$$H_2 + \tfrac{1}{2} O_2 \longrightarrow H_2O$$
$$CO + \tfrac{1}{2} O_2 \longrightarrow CO_2$$
$$CH_4 + 2\,O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O$$

$$z_{CO_2,A} = z_R \cdot \left(X_{CO,R} + X_{CO_2,R}\right) + z_F = 3{,}57 \cdot 10^{-3} \ \frac{kmol_{CO_2}}{kg_{tot}}$$

$$z_{H_2O,A} = z_R \left(X_{H_2,R} + X_{H_2O,R}\right) + 2 \cdot z_F = 6{,}64 \cdot 10^{-3} \ \frac{kmol_{H_2O}}{kg_{tot}}$$

$$z_{O_2,A} = 0{,}21 \cdot z_L - z_R \cdot \tfrac{1}{2}\left(X_{H_2,R} + X_{CO,R}\right) - 2 \cdot z_F = 2{,}33 \cdot 10^{-4} \ \frac{kmol_{O_2}}{kg_{tot}}$$

$$z_{N_2,A} = z_L \cdot 0{,}79 + z_R \cdot X_{N_2,R} = 0{,}0255 \ \frac{kmol_{N_2}}{kg_{tot}}$$

noch 2.4

$$\bar M_A = \frac{1}{z_{CO_2,A} + z_{H_2O,A} + z_{O_2,A} + z_{N_2,A}} = 27{,}82 \ \frac{kg_A}{kmol_A}$$

4/5

$$X_{i,A} = z_{i,A} \cdot \bar M_A$$

$$\Rightarrow \quad X_{CO_2,A} = 0{,}0993 \ \frac{kmol_{CO_2}}{kmol_{tot}}$$

$$X_{H_2O,A} = 0{,}185 \ \frac{kmol_{H_2O}}{kmol_{tot}}$$

$$X_{O_2,A} = 6{,}48 \cdot 10^{-3} \ \frac{kmol_{O_2}}{kmol_{tot}}$$

$$X_{N_2,A} = 0{,}709 \ \frac{kmol_{N_2}}{kmol_{tot}}$$

2.5 geometrische Ähnlichkeit: $\frac{d_{a,P}}{d_{i,P}} \overset{!}{=} \frac{d_{a,ref}}{d_{i,ref}} = 2$

Damköhler ": $Da_P \overset{!}{=} Da_{ref}$

$$\frac{d_{a,ref}\, \pi\, d_{a,ref}^2 \left[\cancel{1 - \left(\frac{d_i}{d_a}\right)^2}\right] \cdot \cancel{\rho_{ref}} \cdot S_{e,ref}^2}{\cancel{4} \cdot \dot m_{ref} \cdot \cancel{a_{ref}}} \overset{!}{=}$$

$$\frac{d_{a,P} \cdot \pi\, d_{a,P}^2 \cdot \left[\cancel{1 - \left(\frac{d_i}{d_a}\right)^2}\right] \cdot \cancel{\rho_P} \cdot S_{e,P}^2}{\cancel{4} \cdot (\dot m_L + \dot m_F) \cdot \cancel{a_P}}$$

noch 2.5

(5/5)

$$\frac{d_{a\,ref}^3 \cdot S_{e\,ref}^2}{\dot m_{ref}} = \frac{d_{ap}^3 \cdot S_{ep}^2}{(\dot m_L + \dot m_F)}$$

$$\Rightarrow \quad d_{ap} = d_{a,ref} \cdot \sqrt[3]{\frac{(\dot m_L + \dot m_F)}{\dot m_{ref}} \cdot \frac{S_{eref}^2}{S_{ep}^2}}$$

$$= 0{,}032 \cdot \sqrt[3]{\frac{0{,}0225}{0{,}0233} \cdot \frac{0{,}23^2}{0{,}156^2}}$$

$$= 0{,}04097 \overset{!}{=} 0{,}041\ m$$

$$d_{ai} = \frac{d_{ap}}{2} = 0{,}0205\ m$$

2.6

$$\dot m_p \cdot u_p + \dot m_R u_R - (\dot m_p + \dot m_R) u_A + (p_E - p_A)\frac{\pi}{4} d_A^2 = 0$$

$$\dot m_p = \dot m_L + \dot m_F = 0{,}0225\ \frac{kg}{s}$$

$$-\frac{0{,}0225 \cdot 20{,}3 + 3{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}2 - 0{,}0263 \cdot 13}{\pi/4 \cdot 0{,}13^2} = -9\ Pa$$

$$-\frac{\dot m_p \cdot u_p + \dot m_R u_R - (\dot m_p + \dot m_R) u_A}{\frac{\pi}{4} d_A^2} = p_E - p_A$$